

Лекция № 2.8

Законы постоянного тока

ПЛАН:

1. Электрический ток
2. Электродвижущая сила
3. Закон Ома
4. Соединение проводников
5. Закон Ома для неоднородного участка
6. Закон Джоуля-Ленца
7. Правила Кирхгофа
8. Литература
9. Вопросы для самопроверки
10. Приложение 1. Обозначения элементов цепи

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

В *электродинамике* — разделе учения об электричестве, в котором рассматриваются явления и процессы, обусловленные движением электрических зарядов или макроскопических заряженных тел, — важнейшим понятием является понятие *электрического тока*.

Электрическим током называется любое *упорядоченное* (направленное) движение электрических зарядов.

В проводнике под действием приложенного электрического поля \vec{E} свободные электрические заряды перемещаются: положительные — по полю, отрицательные — против поля (**рис. 1, а**), т. е. в проводнике возникает электрический ток, называемый **током проводимости**.

Если же упорядоченное движение электрических зарядов осуществляется перемещением в пространстве заряженного макроскопического тела (**рис. 1, б**), то возникает так называемый **конвекционный ток**.

Для возникновения и существования электрического тока необходимо, с одной стороны, наличие свободных **носителей тока** — заряженных частиц, способных перемещаться упорядоченно, а с другой — наличие электрического поля, энергия которого, каким-то образом восполняясь, расходовалась бы на то, чтобы заставить двигаться носители тока.

За направление тока условно принимают направление движения положительных зарядов. Количественной мерой электрического тока служит:

Сила тока — скалярная физическая величина, равная электрическому заряду, проходящему через поперечное сечение проводника в единицу времени:

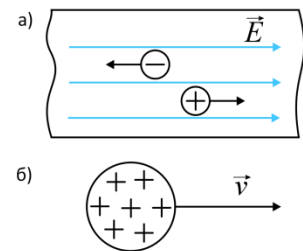


Рис. 1. Электрический ток

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Согласно данной формуле сила тока есть первая производная от заряда по времени.

Если сила тока и его направление не изменяются со временем, то такой ток называется **постоянным**.

Для постоянного тока:

$$I = \frac{q}{t},$$

где q — электрический заряд, проходящий за время t через поперечное сечение проводника.

Физическая величина, равная силе тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного направлению тока, называется **плотностью тока**:

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}$$

Выразим силу и плотность тока через скорость \mathbf{v}_{cp} упорядоченного движения зарядов в проводнике.

Если концентрация носителей тока равна n , и каждый носитель имеет элементарный заряд e (что не обязательно для ионов), то за время dt через поперечное сечение S_{\perp} проводника переносится заряд $dq = neS_{\perp} \mathbf{v}_{cp} dt$. Сила тока:

$$I = \frac{dq}{dt} = neS_{\perp} v_{cp},$$

а плотность тока:

$$\mathbf{j} = ne\mathbf{v}_{cp} \quad (1)$$

Плотность тока — *вектор*, ориентированный по направлению тока, т. е. направление вектора \mathbf{j} совпадает с направлением упорядоченного движения положительных зарядов.

Единица плотности тока — **ампер на метр в квадрате (А/м²)**.

Сила тока сквозь произвольную поверхность S определяется как поток вектора \mathbf{j} , т. е.

$$I = \int_S \mathbf{j} d\mathbf{S} = \int_S j dS \cos \alpha, \quad (2)$$

где $d\mathbf{S} = \mathbf{n} \cdot dS = dS \cos \alpha$;

\mathbf{n} — единичный вектор нормали к площадке dS , составляющей с вектором \mathbf{j} угол α .

Во избежание разночтений условимся *заряд* обозначать сточной буквой q , а *теплоту* — прописной Q .

Единица силы тока — **ампер (А)**.

Амперметр — прибор для измерения силы тока.

Обозначение:



ВНИМАНИЕ! Амперметр подключается в цепь только *последовательно*.

Параллельное подключение может вызвать выход из строя амперметра.

Т.к. для точного определения силы тока амперметры имеют очень низкое сопротивление.

Следовательно, параллельное соединение приводит к *короткому замыканию* в цепи.

Потоком вектора называется интеграл вектора по поверхности:

$$\Phi = \int_S \mathbf{A} d\mathbf{S} = \int_S \mathbf{A} d\mathbf{S} \cdot \mathbf{n}$$

где Φ — поток; \mathbf{A} — вектор; S — поверхность; \mathbf{n} — нормаль к поверхности.

2. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

Если в цепи на носители тока действуют только силы электростатического поля, то происходит перемещение носителей (они предполагаются положительными) от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом. В итоге, это приведет к выравниванию потенциалов во всех точках цепи и к исчезновению электрического поля.

Поэтому для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи устройства, способного создавать и поддерживать разность потенциалов за счет работы сил неэлектростатического происхождения. Такие устройства называются **источниками тока**.

Силы *неэлектростатического происхождения*, действующие на заряды со стороны источников тока, называются **сторонними**.

Роль источника тока в электрической цепи, образно говоря, такая же, как роль насоса, который необходим для перекачивания жидкости в гидравлической системе. Под действием создаваемого поля сторонних сил электрические заряды движутся внутри источника тока против сил электростатического поля, благодаря чему на концах цепи поддерживается разность потенциалов и в цепи течет постоянный электрический ток.

Можно сказать, в источнике тока положительные заряды переносятся на положительный полюс, а отрицательные – на отрицательный.

Сторонние силы совершают *работу по перемещению электрических зарядов*.

Физическая величина, равная работе, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда, называется **электродвижущей силой (ЭДС)**, действующей в цепи:

$$\xi = \frac{A}{q_0} \quad (3)$$

Эта работа производится за счет энергии, затрачиваемой в источнике тока, поэтому величину ξ можно также называть электродвижущей силой источника тока, включенного в цепь.

ЭДС, как и потенциал, выражается в **вольтах**.

Сторонняя сила \mathbf{F}_{cm} , действующая на заряд q_0 , может быть выражена:

$$\mathbf{F}_{cm} = \mathbf{E}_{cm} q_0,$$

где \mathbf{E}_{cm} — напряженность поля сторонних сил.

Природа сторонних сил может быть различной.

Например, в гальванических элементах они возникают за счет энергии химических реакций между электродами и электролитами; в генераторе — за счет механической энергии вращения ротора генератора и т. п.

Часто, вместо того чтобы сказать: «в цепи действуют сторонние силы», говорят: «в цепи действует ЭДС».

Т. е. термин «электродвижущая сила» употребляется как характеристика сторонних сил.

Напряженность — сила, действующая на *единичный* заряд:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$$

Работа же сторонних сил по перемещению заряда q_0 на замкнутом участке цепи равна

$$A = \oint F_{cm} dl = q_0 \oint E_{cm} dl \quad (4)$$

Разделив (4) на q_0 , получим выражение для ЭДС, действующей в цепи:

$$\xi = \oint E_{cm} dl$$

т. е. ЭДС, действующая в замкнутой цепи, может быть определена как циркуляция⁴ вектора напряженности поля сторонних сил.

ЭДС, действующая на участке 1—2, равна

$$\xi_{12} = \int_1^2 E_{cm} dl \quad (5)$$

На заряд q_0 помимо сторонних сил действуют также силы электростатического поля $\mathbf{F}_e = \mathbf{E}_e q_0$. Таким образом, результирующая сила, действующая в цепи на заряд q_0 , равна:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{cm} + \mathbf{F}_e = q_0(\mathbf{E}_{cm} + \mathbf{E}_e)$$

Работа, совершаемая результирующей силой над зарядом q_0 на участке 1—2, равна:

$$A_{12} = q_0 \int_1^2 E_{cm} dl + q_0 \int_1^2 E_e dl$$

Используя выражения (5), можем записать:

$$A_{12} = q_0 \xi_{12} + q_0(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (6)$$

Для замкнутой цепи работа электростатических сил равна нулю, поэтому в данном случае $A_{12} = q_0 \xi_{12}$

Напряжением U на участке 1—2 называется физическая величина, определяемая *работой*, совершаемой *суммарным* полем электростатических (кулоновских) и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на данном участке цепи.

Таким образом, согласно (6),

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \xi_{12}$$

Понятие напряжения является обобщением понятия разности потенциалов: напряжение на концах участка цепи равно разности потенциалов в том случае, если на этом участке не действует ЭДС, т. е. сторонние силы отсутствуют.

Циркуляцией вектора называется криволинейный интеграл второго рода, взятый по произвольному замкнутому контуру:

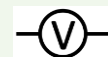
$$\mathcal{C} = \oint \mathbf{A} d\mathbf{l}$$

где \mathcal{C} – циркуляция; \mathbf{A} – вектор; L – контур;

т.к. силы электростатического взаимодействия являются *потенциальными*, то их работа на замкнутом пути равна нулю:

Вольтметр – прибор для напряжения или ЭДС:

Обозначение:



Подключается *параллельно*.

Для повышения точности измерений имеет очень высокое сопротивление.

Поэтому, при последовательном подключении вольтметра, ток по цепи течь *не будет!*

3. ЗАКОН ОМА

Георг Ом экспериментально установил (1826 г.), что сила тока I , текущего по однородному металлическому проводнику (т. е. проводнику, в котором не действуют сторонние силы), пропорциональна напряжению U на концах проводника:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (7)$$

где R — электрическое сопротивление проводника.

Уравнение (7) выражает **закон Ома для участка цепи** (не содержащего источника тока, т.е. $U = \varphi_1 - \varphi_2$, т.к. $\xi = 0$):

Сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника

Величина, обратная сопротивлению:

$$G = \frac{1}{R}$$

называется **электрической проводимостью** проводника.

Единица проводимости — **сименс** (См): 1 См — проводимость участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом.

Сопротивление проводников зависит от его размеров и формы, а также от материала, из которого проводник изготовлен.

Для однородного линейного проводника сопротивление R прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S :

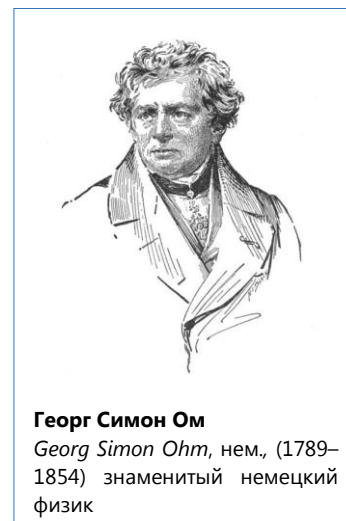
$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ — коэффициент пропорциональности, характеризующий материал проводника, и называемый **удельным электрическим сопротивлением**.

| Удельное сопротивление, Ом·м | | | |
|------------------------------|---------------------|----------|----------------------|
| Серебро | $1,6 \cdot 10^{-8}$ | Алюминий | $2,6 \cdot 10^{-8}$ |
| Медь | $1,7 \cdot 10^{-8}$ | Сталь | $14,0 \cdot 10^{-8}$ |

Наименьшим удельным сопротивлением обладают серебро и медь. На практике наряду с медными применяются алюминиевые провода. Хотя алюминий и имеет большее, чем медь, удельное сопротивление, но зато обладает меньшей плотностью по сравнению с медью.

◀ **Закон Ома (для однородного участка цепи)**



Формула (7) позволяет установить единицу сопротивления — **ом** (Ом).

1 Ом — сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет постоянный ток 1 А.

Единица удельного электрического сопротивления — **Ом·метр (Ом·м)**.

В технике часто применяется другая (внесистемная) единица измерения — **Ом·мм²/м**:

$$\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} = 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Закон Ома можно представить в дифференциальной форме.

$$\vec{j} = \gamma \vec{E},$$

где $\gamma = \frac{1}{\rho}$ – величина, обратная удельному сопротивлению, называется **удельной электрической проводимостью** вещества проводника.

Закон Ома в дифференциальной форме, связывающий плотность тока в любой точке внутри проводника с напряженностью электрического поля в этой же точке, справедлив и для *переменных* полей.

Опыт показывает, что в первом приближении изменение удельного сопротивления, а значит и сопротивления, с температурой описывается линейным законом:

$$\rho = \alpha \rho_0 T \quad R = \alpha R_0 T$$

где ρ и ρ_0 , R и R_0 – соответственно удельные сопротивления и сопротивления проводника при t и 0°C ;

α – **температурный коэффициент сопротивления**, для чистых металлов близкий к $\frac{1}{273} \text{K}^{-1}$;

T – термодинамическая температура.

Качественный ход температурной зависимости сопротивления проводника (металла) представлен на **Рис. 2** (кривая 1).

Впоследствии было обнаружено, что сопротивление многих металлов (например, Al, Pb, Zn и др.) и их сплавов при очень низких температурах T_K (0,14–20 К), называемых **критическими**, характерных для каждого вещества, скачкообразно уменьшается до нуля (кривая 2), т. е. металл становится абсолютным проводником.

Впервые это явление, названное **сверхпроводимостью**, обнаружено в 1911 г. Камерлинг-Оннесом для ртути.

Явление сверхпроводимости объясняется на основе квантовой теории.

4. СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

Последовательное соединение элементов цепи – соединение элементов без разветвлений, когда конец одного проводника соединен с началом другого проводника.

Все элементы связаны друг с другом так, что включающий их участок цепи не имеет *ни одного узла*.

Параллельное соединение элементов – соединение, в котором:

- начала элементов соединены вместе,
- концы элементов соединены вместе.

◀ Закон Ома в дифференциальной форме

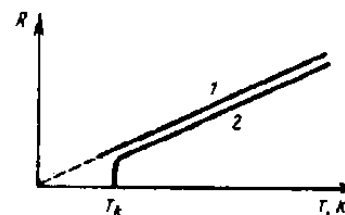


Рис. 2. Зависимость сопротивления проводников от температуры.



Хейке Камерлинг-Оннес

Heike Kamerlingh Onnes, нидерл. (1853–1926) — голландский физик и химик, лауреат Нобелевской премии по физике 1913 г.

На зависимости электрического сопротивления металлов от температуры основано действие **термометров сопротивления**, которые позволяют по градуированной взаимосвязи сопротивления от температуры измерять температуру с точностью до 0,003 К.

Термометры сопротивления, в которых в качестве рабочего вещества используются полупроводники, изготовленные по специальной технологии, называются **термисторами**. Они позволяют измерять температуры с точностью до миллионных долей кельвин.

Применяя закон Ома к *последовательному* и *параллельному соединению*⁶ проводников, можно получить ряд интересных уравнений.

Для **последовательного соединения**:

1. Сила тока, протекающего каждый проводник одинакова:

$$I = const,$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3 \quad (8)$$

Данное уравнение является следствием *закона сохранения электрического заряда*. Количество заряда, втекающего в проводник, должно быть равно количеству вытекающего заряда. Иначе, это бы означало, что в проводнике копится электрический заряд.

2. Напряжение на участке равно сумме напряжений на каждом проводнике:

$$U = \sum_i U_i \quad (9)$$

В данном случае, напряжение определяется разностью потенциалов на концах участка (**рис. 3**):

$$U = \varphi_A - \varphi_D$$

$$U = \varphi_A - \varphi_B + \varphi_B - \varphi_C + \varphi_C - \varphi_D$$

$$U = (\varphi_A - \varphi_B) + (\varphi_B - \varphi_C) + (\varphi_C - \varphi_D)$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

3. Сопротивление участка цепи равно сумме сопротивлений проводников на это участке:

$$R = \sum_i R_i$$

Данное уравнение можно получить, если в закон Ома (7) подставить (9), затем (8):

$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I} = \frac{U_1}{I_1} + \frac{U_2}{I_2} + \frac{U_3}{I_3} =$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

Для **параллельного соединения** (**рис. 4**):

1. Сила тока на участке цепи равно сумме токов протекающих через каждый проводник. Это уравнение также является следствием *закона сохранения электрического заряда*.

$$I = \sum_k I_k$$

2. Напряжение на участке цепи равно напряжению на каждом проводнике в отдельности. В данном случае определяется раз-

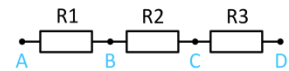


Рис. 3 Последовательное соединение проводников

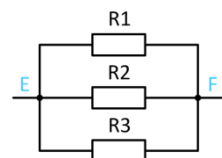


Рис. 4 Параллельное соединение проводников

ностью потенциалов на концах участка. Разность потенциалов зависит от выбора от точек. Всегда можно выбрать точки (узел E и F), для которых:

$$\begin{aligned}
 U &= \varphi_E - \varphi_F \\
 U_1 &= \varphi_E - \varphi_F \\
 U_2 &= \varphi_E - \varphi_F \\
 U_3 &= \varphi_E - \varphi_F \\
 U &= U_1 = U_2 = U_3
 \end{aligned}$$

3. Для сопротивления:

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{R} &= \sum_i \frac{1}{R_i} \\
 \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}
 \end{aligned}$$

Все сказанное выше можно представить в виде небольшой таблицы.

| Соединение проводников | |
|------------------------|--------------------------------------|
| Последовательное | Параллельное |
| Сила тока | |
| $I = const$ | $I = \sum_k I_k$ |
| Напряжение | |
| $U = \sum_i U_i$ | $U = const$ |
| Сопротивление | |
| $R = \sum_i R_i$ | $\frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_i}$ |

5. ЗАКОН ОМА ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА

Мы рассматривали закон Ома (7) для однородного участка цепи, т.е. такого, в котором не действует э.д.с. (*не действуют сторонние силы*).

Теперь рассмотрим **неоднородный участок цепи**, где действующую э.д.с. на участке $1-2$ обозначим через ξ_{12} , а приложенную на концах участка разность потенциалов — через $(\varphi_1 - \varphi_2)$.

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \xi_{12}}{R} \quad (10)$$

Выражение (7) представляет собой закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме, который является обобщенным законом Ома.

Если на данном участке цепи источник тока отсутствует ($\xi = 0$), то из (10) приходим к закону Ома для однородного участка цепи (7):

Однородный участок – участок цепи, на котором нет источников тока.

Неоднородный – участок, на котором присутствуют источники тока.

◀ **Закон Ома для неоднородного участка**

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{R} = \frac{U}{R},$$

(при отсутствии сторонних сил напряжение на концах участка равно разности потенциалов).

Если же электрическая цепь *замкнута*, то выбранные точки 1 и 2 совпадают, $\varphi_1 = \varphi_2$. Тогда из (10) получаем закон Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\xi}{R}$$

где ξ – э.д.с., действующая в цепи;

R – суммарное сопротивление всей цепи.

В общем случае $R = r + R_0$, где r — **внутреннее сопротивление источника тока**, R_0 – сопротивление внешней цепи.

Поэтому закон Ома для замкнутой цепи будет иметь вид

$$I = \frac{\xi}{(r + R_0)}$$

◀ **Закон Ома для замкнутой цепи**

Если цепь *разомкнута* и, следовательно, в ней ток отсутствует ($I = 0$), то из закона Ома (10) получим, что $U = \varphi_1 - \varphi_2$, т. е.

Э.д.с., действующая в разомкнутой цепи, равна разности потенциалов на ее концах.

Следовательно, для того чтобы найти э.д.с. источника тока, надо измерить разность потенциалов на его клеммах при разомкнутой цепи.

Различные формулы закона Ома можно представить в виде таблицы:

| Закон Ома | Формула | Примечания | |
|--|--|--------------------------------------|---------------|
| Общая форма | $I = \frac{U}{R}$ | $U = (\varphi_1 - \varphi_2) + \xi,$ | $R = r + R_0$ |
| дифференциальная форма | $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ | $\gamma = \frac{1}{\rho}$ | |
| для однородного участка | $I = \frac{U}{R}$ | $U = (\varphi_1 - \varphi_2),$ | $R = R_0$ |
| для неоднородного участка (обобщенный закон Ома) | $I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \xi_{12}}{R}$ | $U = (\varphi_1 - \varphi_2) + \xi,$ | $R = r + R_0$ |
| для замкнутой цепи | $I = \frac{\xi}{R}$ | $U = \xi,$ | $R = r + R_0$ |

6. ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА

Рассмотрим однородный проводник, к концам которого приложено напряжение U . За время dt через сечение проводника переносится заряд $dq = Idt$.

Так как ток представляет собой перемещение заряда dq под действием электрического поля, то работа тока:

$$dA = Udq = IUdt \quad (11)$$

Если сопротивление проводника R , то, используя закон Ома (7), получим

$$dA = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt \quad (12)$$

Из (11) и (12) следует, что мощность тока

$$P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (13)$$

Если ток проходит по *неподвижному* металлическому проводнику, то вся работа тока идет на его нагревание и, по закону сохранения энергии,

$$dQ = dA, \quad (14)$$

где dQ – количество теплоты.

Таким образом, используя выражения (11), (12) и (14), получим

$$dQ = IUdt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt \quad (15)$$

Выражение (15) представляет собой **закон Джоуля-Ленца**.

Формула (16) является обобщенным выражением **закона Джоуля-Ленца в дифференциальной форме**, пригодным для любого проводника.

$$w = jE = \gamma E^2 \quad (16)$$

7. ПРАВИЛА КИРХГОФА

Обобщенный закон Ома позволяет рассчитать практически любую сложную цепь. Однако непосредственный расчет разветвленных цепей, содержащих несколько замкнутых контуров (контуров могут иметь общие участки, каждый из контуров может иметь несколько источников тока и т. д.), довольно сложен.

Эта задача решается более просто с помощью **двух правил Кирхгофа**.

Любая точка разветвления цепи, в которой сходится не менее трех проводников с током, называется **узлом**.

При этом ток, входящий в узел, считается **положительным**, а ток, выходящий из узла, — **отрицательным**.

Закон установлен в 1841 г. английским физиком Джеймсом Джоулем и независимо от него в 1842 г. русским учёным Эмилем Х. Ленцем.

Единицы измерения

| | |
|-----------------|-------------------|
| Сила тока, I | Ампер, А |
| Напряжение, U | Вольт, В |
| Работа, A | Джоуль, Дж |
| Мощность, P | Ватт, Вт |

На практике применяются также внесистемные единицы работы тока: **ватт-час** (Вт·ч) и **киловатт-час** (кВт·ч):

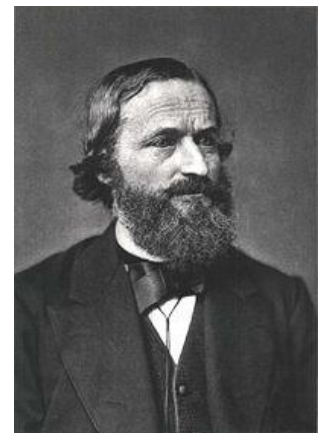
1 Вт·ч – работа тока мощностью 1 Вт в течение 1 ч.

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

◀ **Закон Джоуля-Ленца (в интегральной форме)**

◀ **Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме**



Густав Роберт Кирхгоф

Gustav Robert Kirchhoff, нем., (1824—1887) — великий немецкий физик.

Первое правило Кирхгофа

Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю

$$\sum_k I_k = 0$$

Например, для **рис. 5** первое правило Кирхгофа запишется так:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

Первое правило Кирхгофа вытекает из закона *сохранения* электрического заряда. Действительно, в случае установившегося постоянного тока ни в одной точке проводника и ни на одном его участке не должны накапливаться электрические заряды. В противном случае токи не могли бы оставаться постоянными.

Второе правило Кирхгофа получается из обобщенного закона Ома для разветвленных цепей. Рассмотрим контур, состоящий из трех участков (**рис. 6**).

Направление обхода по часовой стрелке примем за положительное, отметив, что *выбор этого направления совершенно произволен*.

Все токи, совпадающие по направлению с направлением обхода контура, считаются *положительными*, не совпадающие с направлением обхода — *отрицательными*.

Источники тока считаются *положительными*, если они создают ток, направленный в сторону обхода контура.

Применяя к участкам закон Ома (7), можно записать:

$$\begin{cases} I_1 R_1 = \varphi_A - \varphi_B + \xi_1 \\ -I_2 R_2 = \varphi_B - \varphi_C - \xi_2 \\ I_3 R_3 = \varphi_C - \varphi_A + \xi_3 \end{cases}$$

Складывая *почленно* эти уравнения, получим

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_3 R_3 = \xi_1 - \xi_2 + \xi_3 \quad (17)$$

Уравнение (17) выражает второе правило Кирхгофа:

Второе правило Кирхгофа

В любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивления R_i соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС ξ_k , встречающихся в этом контуре

$$\sum_i I_i R_i = \sum_k \xi_k \quad (18)$$

Различие индексов суммирования i и k в левой и правой частях уравнения указывает на то, что число действующих на контуре ЭДС может не равняться числу проводников.

Можно сказать, что первое правило Кирхгофа формулируется для узла, второе — для замкнутого контура.

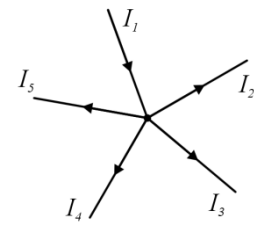


Рис. 5. Первое правило Кирхгофа

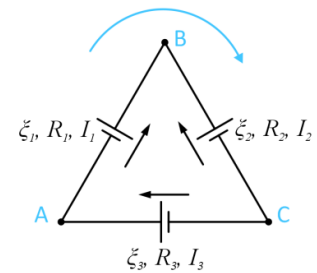


Рис. 6. Второе правило Кирхгофа

Правила Кирхгофа также называют *законами Кирхгофа*, что не правильно.

Любые физические законы устанавливает взаимосвязи между какими-либо величинами.

В отличие от них правила Кирхгофа не устанавливают связь, а являются *методическими приемами* облегчающими решение.

Поэтому, лучше придерживаться приведенного названия (*правила Кирхгофа*).

Подходы к решению проблем

Алгоритм расчета сложных цепей

При расчете сложных цепей постоянного тока с применением правил Кирхгофа необходимо:

1. Выбрать произвольное направление токов на всех участках цепи.

Произвольность выбора не повлияет на правильность ответа. Действительное направление токов определяется при решении задачи: если искомый ток получится *положительным*, то его направление было выбрано правильно, *отрицательным* — его истинное направление противоположно выбранному.

2. Выбрать направление обхода контура и строго его придерживаться.

Произведение $I_i R_i$ положительно, если ток на данном участке совпадает с направлением обхода, и, наоборот, ЭДС, действующие по выбранному направлению обхода, считаются *положительными*, против — *отрицательными*.

3. Составить столько уравнений, чтобы их число было равно числу искомых величин.

В систему уравнений должны входить все сопротивления и ЭДС рассматриваемой цепи.

Каждый рассматриваемый контур должен содержать хотя бы один элемент, не содержащийся в предыдущих контурах, иначе получатся уравнения, являющиеся простой комбинацией уже составленных.

8. ЛИТЕРАТУРА


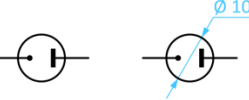


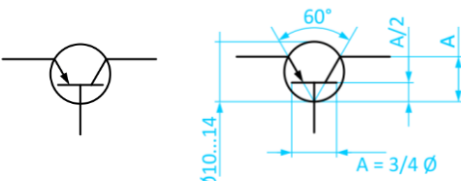
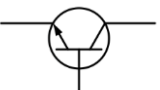
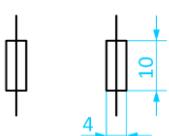

1. Трофимова Т.И.
Курс физики. – М.: Академия, 2010. – 560 с.
2. Савельев И.В.
Курс общей физики. В 5 томах. Том 2. Электричество и магнетизм. – М.: Лань, 2011. – 348 с.
3. Детлаф А. А., Яворский Б.М.
Курс физики. – М.: Академия, 2009. – 720 с.
4. Сивухин Д.В.
Общий курс физики. В 5 томах. Том 3. Электричество. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 656 с.
5. Ваганова Т.Г.
Физика. Практикум по решению задач. Часть I: Механика. Электричество. Магнетизм. – Улан-Удэ: Издательство ВСГТУ, 2009. – 114 с.
6. Чертов А.Г, Воробьев А.А.
Задачник по физике. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 640 с.

9. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какое движение зарядов называется электрическим током?
2. Как связаны сила тока и плотность тока?
3. Чем обусловлено ЭДС?
4. Что такое напряжение? Как оно связано с ЭДС?
5. Какие формы закона Ома вы знаете?
6. Выведите формулу сопротивления при параллельном соединении проводников, используя закон Ома.
7. Что устанавливает закон Джоуля-Ленца?
8. Следствием какого закона является правило Кирхгофа?
9. Для чего используются правила Кирхгофа?

10. ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

| ОБОЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ | |
|---|------------------------------|
| Элемент цепи | Обозначение / Начертание, мм |
| Ток | |
| – постоянный; | — |
| – переменный; | ~ |
| – постоянный и переменный; | ~ |
| Провод | — толщина 0,3...0,4 |
| Пересечение проводов | |
| Соединение проводов | |
| Элемент гальванический, аккумулятор | |
| Батарея гальванических или аккумуляторных элементов | |
| Контакт замыкающий (ключ) | |
| Резистор постоянный | |
| Резистор переменный, реостат | |
| Конденсатор постоянный | |
| Конденсатор электролитический | |
| Катушка индуктивности (дроссель) | |
| – без сердечника; | |
| – с сердечником; | |

| ОБОЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ | |
|---|---|
| Элемент цепи | Обозначение / Начертание, мм |
| Лампа накаливания |  |
| Неоновая лампа |  |
| Вольтметр, амперметр |  |
| Диод |  |
| Триод полупроводниковый (транзистор) – р-п-р типа; |  |
| – п-р-п типа; |  |
| Предохранитель плавкий |  |
| Контакт разборного соединения |  |

Перечень стандартов ЕСКД на условные обозначения в схемах:

| | | | |
|---------------|---|---------------|---|
| ГОСТ 2.721-74 | Обозначения условные графические общего применения | ГОСТ 2.747-68 | Размеры условных графических обозначений |
| ГОСТ 2.722-68 | Машины электрические | ГОСТ 2.750-68 | Род тока и напряжений; виды соединения обмоток; формы импульсов |
| ГОСТ 2.723-68 | Катушки индуктивности, реакторы, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители | ГОСТ 2.751-73 | Электрические связи, провода, кабели и шины |
| ГОСТ 2.725-68 | Устройства коммутационные | ГОСТ 2.754-72 | Обозначения условные графические электрического оборудования и проводок на схемах |
| ГОСТ 2.726-68 | Токосъемники | ГОСТ 2.755-87 | Устройства коммутационные и контактные соединения |
| ГОСТ 2.727-68 | Разрядники, предохранители | ГОСТ 2.758-81 | Сигнальная техника |
| ГОСТ 2.728-74 | Резисторы, конденсаторы | ГОСТ 2.759-82 | Элементы аналоговой техники |
| ГОСТ 2.729-68 | Приборы электроизмерительные | ГОСТ 2.768-90 | Источники электрохимические, электротермические и тепловые |
| ГОСТ 2.730-73 | Приборы полупроводниковые | | |
| ГОСТ 2.731-81 | Приборы электровакуумные | | |
| ГОСТ 2.732-68 | Источники света | | |